

УДК 624.132.3

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2023.101.1.60

ВИЗНАЧЕННЯ КРИТИЧНОЇ ГЛИБИНИ НАПІВБЛОКОВАНОГО РУЙНУВАННЯ ҐРУНТУ ПРЯМОЛІНІЙНИМ РІЗЦЕМ

Кравець С. В.¹, Супонев В. М.², Форсюк С. Л.¹

¹ Національний університет водного господарства та природокористування

² Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. Розглянуто методику визначення критичної глибини руйнування ґрунту для умов напівблокованого та напівблокованого асиметричного різання (з підпірною стінкою з одного боку різця). Здійснені в роботі розрахунки демонструють, що в разі зменшення кута різання ножа від 50° до 20° відносна глибина сколювання збільшується. Для ґрунтів з близькими фізико-механічними властивостями, але з різною вологістю з її збільшенням відносна глибина зменшується. Така залежність є визначальною і для збільшення коефіцієнтів зчеплення ґрунту. За незмінних параметрів ножа ($\alpha_p = 30^\circ$) відносна глибина зсуву для різних ґрунтів змінюється у верхньому ярусі в таких межах: для напівблокованого різання – від 4,73 до 7,32, для напівблокованого асиметричного – від 5,77 до 10,69. Таким чином, геометричні параметри ЗРО більше впливають на відносну глибину зсуву, ніж фізико-механічні параметри ґрунтів. Запропонована методика дозволяє під час проектування нової землерийної техніки підвищити її енергоефективність завдяки впровадженню критичноглибинного напівблокованого різання ґрунтів.

Ключові слова: енергоємність руйнування ґрунту, критичноглибинне різання ґрунтів, напівблоковане різання, напівблоковане асиметричне різання.

Вступ

У процесі розвитку суспільства збільшується потреба в здійсненні будівельних робіт, одним з етапів яких є земляні. Під час роботи землерийної машини одним з головних елементів взаємодії робочого органу з ґрунтом є процес його руйнування різцем. Енергоефективність цього процесу залежить від властивостей ґрунту, товщини його шару, що руйнується різцем за один прохід, типу різання тощо.

Аналіз публікацій

Існує велика кількість безтраншейних технологій прокладання підземних інженерних комунікацій, і всі вони мають своє призначення [1–5]. Одним з напрямів прокладання лінійно-протяжних комунікацій є технології з використанням ножових робочих органів. Визначено, що найбільш ефективною є робота з використанням багатоступеневих ножів, кожен з яких працює в умовах критичної глибини різання ґрунтів.

У разі збільшення глибини різання ґрунту різцем у верхньому ярусі до $h < h_{кр}$ ($h_{кр}$ – критична глибина різання) зменшуються енергоємності процесу, оскільки інтенсивність збільшення опору різанню зменшується, порівнюючи з площею поперечного перерізу щілини, яка нарізається. Якщо $h > h_{кр}$, інтенсивність збільшення опору збільшується

після ущільнення ґрунту в бічні стінки щілини, а площа руйнування зменшується. Таким чином, енергоємність процесу підвищується [6]. На рис. 1 наведені закономірності зміни сили різання ґрунту від ширини (рис. 1, а), глибини (рис. 1, б) й енергоємності різання (рис. 1, в). Із останньої залежності випливає, що критичній глибині різання відповідає мінімальна питома енергоємність руйнування ґрунту [7, 8].

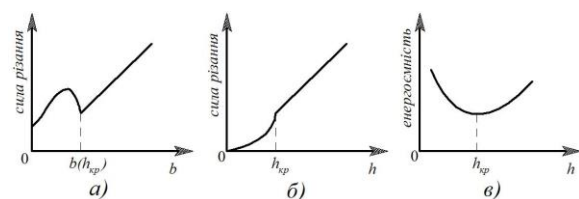


Рис. 1. Залежності руйнування ґрунту: а – сили різання від ширини ножа; б – сили від глибини різання; в – енергоємності від глибини різання.

Мета та постановка завдання

Метою нашої роботи є створення методики визначення критичної глибини різання ґрунтів прямим ножом в умовах напівблокованого та асиметричного різання та визначення закономірностей впливу на неї геометричних параметрів різця та фізико-механічних властивостей ґрунту.

Обґрунтування параметрів

Для визначення величини критичної глибини різання залежно від умов (верхній, нижній яруси), типу різання (блоковане, напівблоковане, вільне, комбіноване) і вихідних даних для найбільш ймовірних типів талих ґрунтів було розроблено розрахункову схему напівблокованої взаємодії найбільш поширеного прямолінійного різця з ґрунтом (рис. 2, а, б) [9]. Були прийняті такі припущення: 1) ґрунт – однорідне ізотропне середовище, що визначається зчепленням, внутрішнім і зовнішнім тертям, щільністю та вологістю; 2)

елемент – це тверде тіло у вигляді трикутної призми з одним симетричним конічним сектором збоку (рис. 2, в) [6, 9, 11]; 3) критична глибина різання постійна незалежно від режиму роботи землерийного робочого органу (режим заглиблення чи сталий режим); 4) вплив швидкості різання та сила тяжіння ґрунту на опір його руйнування не визначені [6, 12]; 5) закон розподілу нормального тиску на лобову поверхню ножа в зоні зсуву ґрунту на денну поверхню прийнятий лінійним вздовж глибини [6].

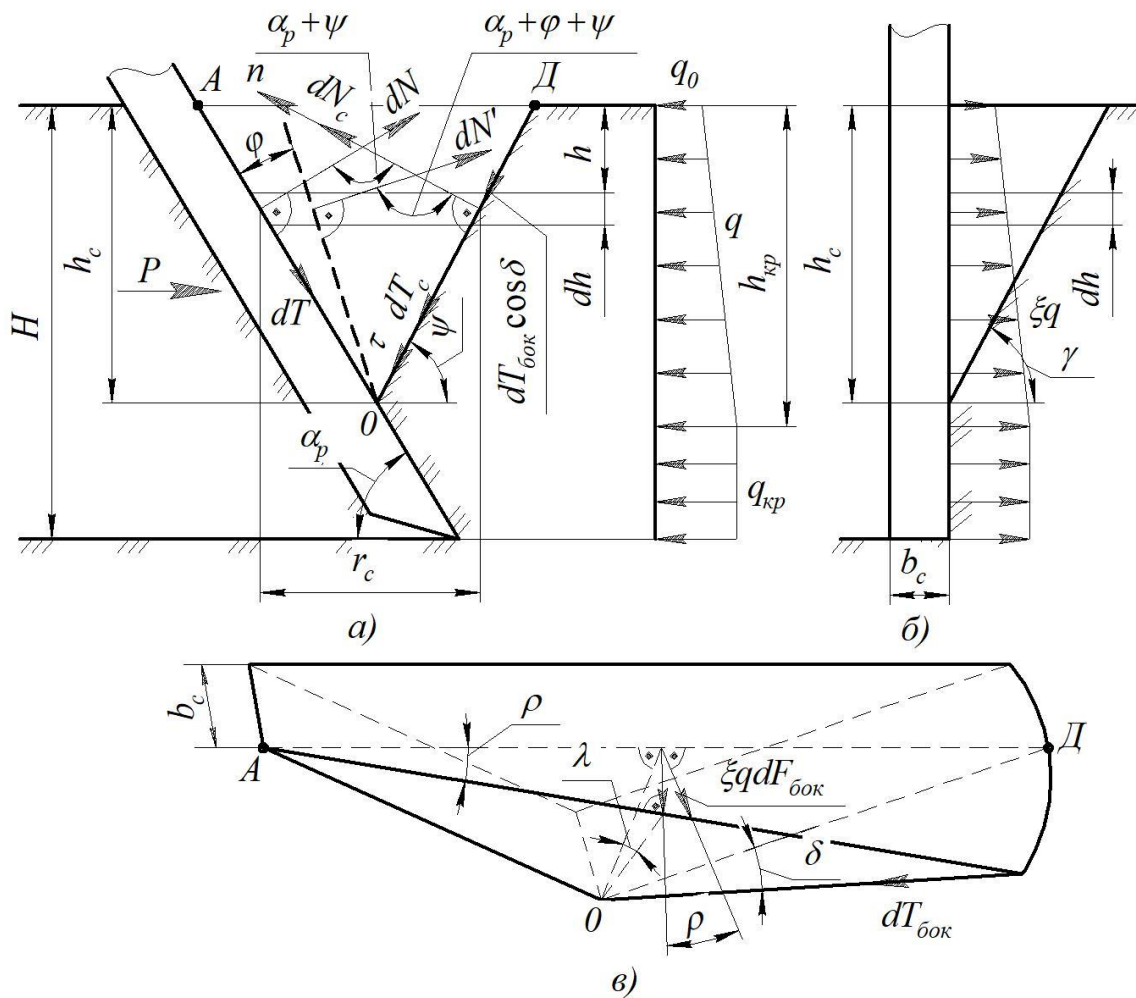


Рис. 2. Схема напівблокованої взаємодії різця з ґрунтовим середовищем: а – у поздовжній площині; б – у поперечній площині; в – форма елемента стружки в процесі заглиблення ножа.

Лінійний закон розподілу нормального тиску на лобову площину ножа можна обґрунтувати на основі теорії різання ґрунтів Ю. О. Ветрова Ю. О. [6] Як було зазначено Ю. О. Ветровим, сила напівблокованого різання у верхньому ярусі за умови, що прорізь утворюється з боковим розширенням, як наведено на рис. 2, б $\left(\gamma < \frac{\pi}{2}\right)$, дорівнює

$$P(h) = \varphi_{\alpha_p} m_g b_c h + 2m_{бок.зр} h + m_{бок} h^2, \quad (1)$$

де φ_{α_p} – коефіцієнт, що враховує вплив кута різання ножа на опір вільного різання; m_g – питома сила вільного різання ґрунту різцем під кутом різання 45° ; b_c, h – ширина ножа та глибина різання; $m_{бок.зр}, m_{бок}$ – коефіцієнти, які визначають питому силу подолання

опору ґрунту зрізу боковими ребрами ножа та руйнування ґрунту в боковому розширенні прорізу.

Водночас

$$\begin{aligned} P(h) &= q(h) b_c h (1 + \operatorname{tg} \varphi \cdot \operatorname{ctg} \alpha_p) = \\ &= q(h) b_c h \frac{\sin(\alpha_p + \varphi)}{\cos \varphi \sin \alpha_p}, \end{aligned} \quad (2)$$

тоді середній нормальний тиск ґрунту на лобову площину ножа вздовж глибини верхнього ярусу розподілено так:

$$\begin{aligned} q(h) &= \frac{P \cos \varphi \sin \alpha_p}{b_c h \sin(\alpha_p + \varphi)} = \\ &= \left(\varphi_{\alpha_p} m_e + 2 \frac{m_{\text{бок.зр}}}{b_c} + \frac{m_{\text{бок}}}{b_c} h \right) \frac{\cos \varphi \sin \alpha_p}{\sin(\alpha_p + \varphi)}, \end{aligned} \quad (3)$$

де φ – кут зовнішнього тертя.

Отже, на основі вищезазначеного та згідно з результатами експериментальних досліджень [14] лінійний закон розподілу норма-

$$A_1 = \frac{\cos \varphi \left(\cos \varphi + \sqrt{\sin^2 \varphi_0 - \sin^2 \varphi} \right) \cdot \left(\sin \varphi_0 - \cos \varphi_{\alpha} + \sqrt{1 - \sin^2 \varphi_0 - \sin^2 \varphi_{\alpha}} \right)^2}{\cos^2 \varphi_0 (1 - \sin \varphi_0)}, \quad (6)$$

$$\text{де } \varphi_{\alpha} = \pi - \alpha_p - \frac{\varphi}{2} - \frac{1}{2} \arcsin \frac{\sin \varphi}{\sin \varphi_0}.$$

На елементарний об'єм елемента стружки, висотою dh , до моменту сколювання діють сили, які зведені у вертикальну площину ОАД (рис. 2, а): нормальна реакція dN_c і дотичні сили dT_c , активна сила $dN' = \frac{dN}{\cos \varphi}$,

спрямована під кутом зовнішнього тертя ґрунту φ до нормалі лобової площини ножа; $dT_{\text{бок}} \cos \delta$ в площині зсуву ґрунту. Систему рівнянь рівноваги всіх сил на нормальну (n) та дотичну (τ) осі до лобової площини сколювання можна записати так:

$$\begin{cases} \sum P_n = dN_c + dN' \cos(\alpha_p + \varphi + \psi) = 0 \\ \sum P_{\tau} = dT_c + dT_{\text{бок}} \cos \delta - dN' \sin(\alpha_p + \varphi + \psi) = 0. \end{cases} \quad (7)$$

З першого рівняння системи (7) отримуємо

льного тиску ґрунту на лобову площину ножа вздовж глибини є достовірним. На денній поверхні діє мінімальний тиск [14]

$$q_0 = c \cdot \cos \varphi_0 (A_1 - 1), \quad (4)$$

а на критичній глибині досягає максимально можливого значення за несною спроможністю ґрунту та визначається за формулою Паукера [15:]

$$q_{kp} = \left(\gamma_{zp} h_c + \frac{c}{\operatorname{tg} \varphi_0} \right) \operatorname{tg}^4 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_0}{2} \right), \quad (5)$$

де γ_{zp} , c – питома сила тяжіння та коефіцієнт зчеплення ґрунту; h_c – середня глибина сколювання ґрунту різцем; φ_0 – кут внутрішнього тертя; A_1 – коефіцієнт, який залежить від кута різання. Для проміжних граней за формулою В. В. Соколовського [13]

$$\begin{aligned} dN_c &= - \frac{dN}{\cos \varphi} \cos(\alpha_p + \varphi + \psi) = \\ &= - \frac{q b_c}{\cos \varphi \sin \alpha_p} \cos(\alpha_p + \varphi + \psi) dh \end{aligned}, \quad (8)$$

де dh – елементарна глибина різання.

Закон розподілу нормального тиску ґрунту на ніж вздовж глибини

$$q = q_0 + \frac{q_{kp} - q_0}{h_{kp}} h = q_0 + \frac{q_{kp} - q_0}{h_c} k_{nep} h, \quad (9)$$

де k_{nep} – співвідношення глибини зони гарантованого сколювання ґрунту h_c до критичної глибини різання h_{kp} ($k_{nep} = 0,9 \dots 0,95$); h – поточне значення глибини.

Підставивши (9) до виразу (8), отримуємо

$$dN_c = - \frac{\cos(\alpha_p + \varphi + \psi)}{\cos \varphi \sin \alpha_p} b_c \left(q_0 + \frac{q_{kp} - q_0}{h_c} k_{nep} h \right) dh, \quad (10)$$

Елементарні дотичні сили, які діють у лобовій (dT_c) і боковій ($dT_{бок}$) площинах сколювання визначаються за законом Кулона:

$$dT_c = tg\varphi_0 dN_c + cdF_c, \quad (11)$$

$$dT_{бок} = (\zeta q \cos \rho \cos \lambda tg\varphi_0 + c) dF_{бок}, \quad (12)$$

де F_c , $dF_{бок}$ – елементарні площі лобової і бокової площин сколювання; ζ – коефіцієнт бокового тиску; ρ , δ , λ – кути, які утворюються площиною сколювання з вертикальною площиною (рис. 2, в). Елементарні площі дорівнюють:

$$\begin{aligned} & (ctg\alpha_p + ctg\psi) \left[\zeta \left(q_0 + \frac{q_{кр} - q_0}{3} k_{неп} \right) \cos \delta \cos \rho tg\varphi_0 + \frac{c\rho}{\sin \psi} + c \frac{\cos \delta}{\cos \lambda} \right] h_c = \\ & = \left(q_0 + \frac{q_{кр} - q_0}{3} k_{неп} \right) \left[\frac{\sin(\alpha_p + \varphi + \psi)}{\cos \varphi \sin \alpha_p} + tg\varphi_0 \frac{\cos(\alpha_p + \varphi + \psi)}{\cos \varphi \sin \alpha_p} \right] b_c - \frac{c}{\sin \psi} b_c, \end{aligned} \quad (15)$$

Із (15) визначимо математичну модель критичної глибини різання $h_{кр}$ та гарантованого сколювання ґрунту h_c :

$$h_{кр} = \frac{h_c}{k_{неп}} = \frac{\left(q_0 + \frac{q_{кр} - q_0}{3} k_{неп} \right) \frac{\sin(\alpha_p + \varphi + \varphi_0 + \psi)}{\cos \varphi \cos \varphi_0 \sin \alpha_p} - \frac{c}{\sin \psi}}{\frac{ctg\alpha_p + ctg\psi}{2} \left[\zeta \left(q_0 + \frac{q_{кр} - q_0}{3} k_{неп} \right) \cos \delta \cos \rho tg\varphi_0 + c \left(\frac{\rho}{\sin \psi} + \frac{\cos \delta}{\cos \lambda} \right) \right] k_{неп}} b_c, \quad (16)$$

Кути ρ , δ , λ визначаються за залежностями (рис. 2, в):

$$\cos \rho = \sqrt{1 - \left(\frac{ctg\gamma}{ctg\alpha_p + ctg\psi} \right)^2}, \quad (17)$$

$$\cos \lambda = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{ctg\alpha_p ctg\gamma}{ctg\alpha_p + ctg\psi} \right)^2}}, \quad (18)$$

$$\cos \delta = 1 - 2(ctg\alpha_p + ctg\psi)^2 \sin^2 \psi \sin^2 \frac{\rho}{2}, \quad (19)$$

де γ – кут нахилу бокових площин елемента стружки до горизонту:

$$\gamma = \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_0}{2}.$$

Рівняння (20) може бути використано для визначення критичної глибини різання ґрунту у верхньому та в наступних ярусах. Умови

$$\begin{aligned} dF_c &= (b_c + 2\rho r_c) \frac{dh}{\sin \psi} = \\ &= \left[b_c + 2\rho (ctg\alpha_p + ctg\psi)(h_c - h) \right] \frac{dh}{\sin \psi}, \end{aligned} \quad (13)$$

$$dF_{бок} = r_c \frac{dh}{\cos \lambda} = (ctg\alpha_p + ctg\psi)(h_c - h) \frac{dh}{\cos \lambda}, \quad (14)$$

де r_c – поточне значення радіуса сколювання ґрунту.

Підставивши вирази (11) і (12) до другого рівняння системи (7) з огляду на (10), (13) і (14) та проінтегрувавши його в межах від 0 до h_c , отримуємо:

роботи ґрунторозробних органів у цих ярусах відрізняються, зокрема у верхньому ярусі ґрунторозробний орган внаслідок впливу денної поверхні працює в умовах напівблокованого різання й утворює прорізь з боковим розвалом, в якому ґрунт руйнується внаслідок деформації відриву, тому на бокових площинах елементів стружки відсутні бічний тиск і сили тертя утворюваних елементів стружки на масив ґрунту ($\xi q = 0$). З огляду на це залежність (16) для визначення глибини сколювання ґрунту у верхньому ярусі можна записати так:

$$h_c = \frac{\left(q_0 + \frac{q_{кр} - q_0}{2} k_{неп} \right) \frac{\sin(\alpha_p + \varphi + \varphi_0 + \psi)}{\cos \varphi \cos \varphi_0 \sin \alpha_p} - \frac{c}{\sin \psi}}{\frac{ctg\alpha_p + ctg\psi}{2} c \left(\frac{\rho}{\sin \psi} + \frac{\cos \delta}{\cos \lambda} \right)} b_c. \quad (20)$$

Рівняння (20) підтверджує експериментальні дані [6] про прямопропорційну залежність критичної глибини різання $h_{кр}$ від ширини різця у верхньому ярусі.

У рівнянні (20) невідомим є параметр ψ . Для $H \geq h_{кр}$ значення кута сколювання ψ є таким, що опір відокремлення елементів стружки й опір різанню будуть мінімальні.

Опір під час глибокого різання дорівнює [9, 16]

$$P = k_1 b_{c_1} h_{кр_1} + k_2 b_{c_2} (H - h_{кр_1}), \quad (21)$$

де k_1 , k_2 , b_{c_1} , b_{c_2} – питомий опір різанню та ширина різця в докритичній і закритичній зонах; H – повна глибина різання ґрунту. Питомий опір різанню k_1 залежить від середнього нормального тиску ґрунту на лобову площину ножа в зоні сколювання $\left(q_{ср} = \frac{q_0 + q_{кр}}{2} \right)$, від кутів загострення, різання та зовнішнього тертя ґрунту. Величина k_2 визначається критичним значенням нормального тиску ґрунту на ніж $q_{кр}$, кутом зовнішнього тертя ґрунту та геометричними параметрами різця.

Дослідимо функцію (21) на екстремум за кутом зсуву ґрунту ψ . Оскільки всі параметри, що належать до залежності (21), крім $h_{кр_1}$, не залежать від кута ψ , то умову екстремуму запишемо так:

$$\frac{dP}{d\psi} = \frac{dh_{кр_1}}{d\psi} (k_1 b_{c_1} - k_2 b_{c_2}) = 0. \quad (22)$$

Отже, $\frac{dh_{кр_1}}{d\psi} = 0$; $h_{кр_1} = \frac{h_{c_1}}{k_{неп}} = \max$, тому що

$h_{кр_1} \neq 0$ (min). Цей висновок також впливає з епюри нормального тиску на лобову площину ножа (рис. 2, а). Мінімальний опір різанню можливий (якщо глибина різання $H > h_{кр_1}$) за мінімальної площі епюри нормального тиску, а так само можливо, якщо $h_{кр_1} = \frac{h_{c_1}}{k_{неп}} = \max$ і $h_{c_1} = \max$. Таким чином,

кут зсуву ґрунту визначається максимальним значенням глибини зони сколювання.

Максимальні значення відносної глибини сколювання $\left(\frac{h_c}{b_c} \right)$ і відповідні їм кути зсуву

ґрунту визначені для твердого супіску, твердого суглинку та напівтвердої глини для кутів різання ножа: $\alpha_p = 20...60^\circ$.

Залежності відносної глибини сколювання ґрунту від кута зсуву для різних кутів різання ножа наведені на рис. 3.

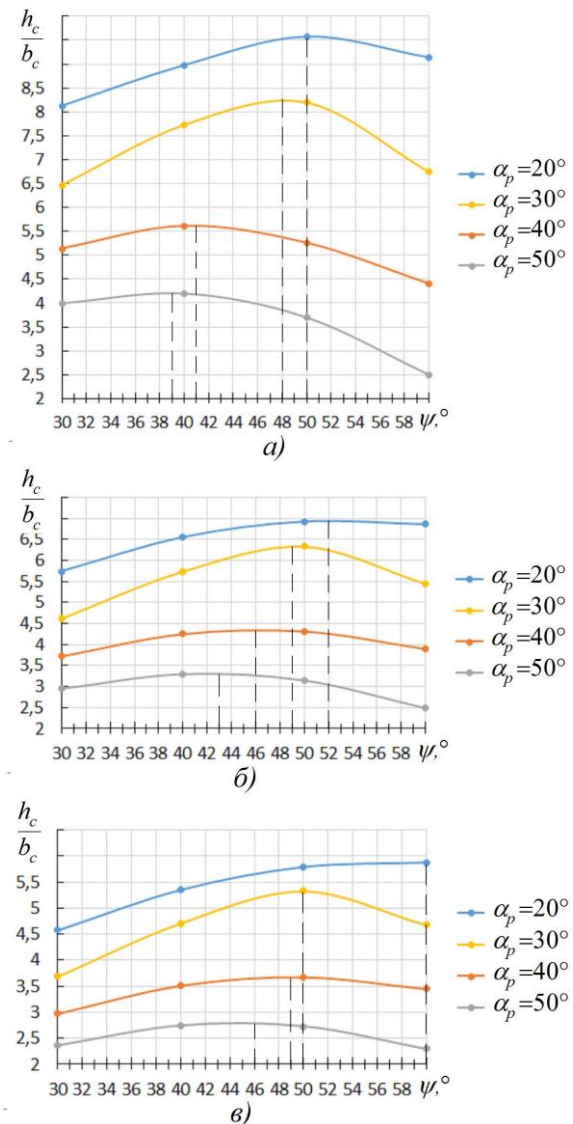


Рис. 3. Залежність відносної глибини сколювання від поздовжнього кута зсуву ґрунту для напівблокованого різання для різних кутів різання ножа: а – твердий супісок; б – твердий суглинок; в – напівтверда глина

Залежність відносної глибини сколювання від кута різання ножа для напівблокованого

різання у верхньому ярусі для ґрунтів другої і третьої категорій наведені на рис. 4, а.

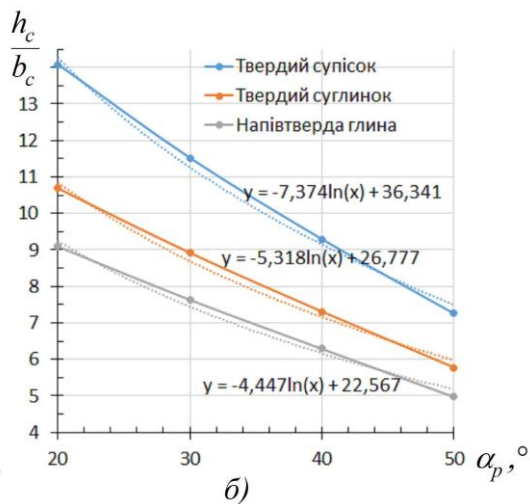
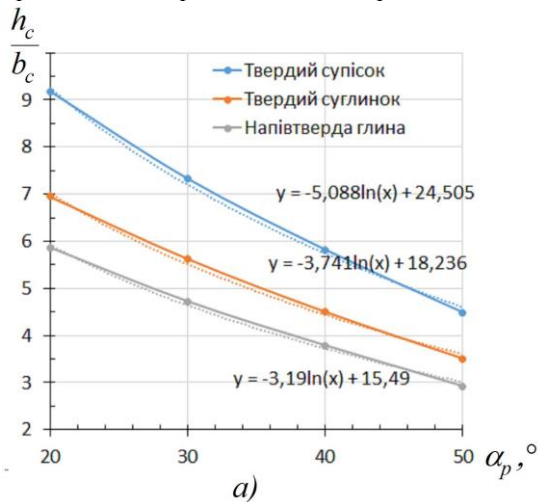


Рис. 4. Залежність відносної глибини сколювання ґрунтів від кута різання ножа у верхньому ярусі: а) для напівблокованого різання; б) для напівблокованого асиметричного різання

Для крайніх бокових різців, які працюють за напівблокованою асиметричною схемою, у математичній моделі (20) необхідно прийняти, що $\rho = 0$ і $\gamma = \frac{\pi}{2}$.

Тоді

$$h_c = 2 \frac{\left(q_0 + \frac{q_{сп} - q_0}{2} k_{пер} \right) \frac{\sin(\alpha_p + \varphi + \varphi_0 + \psi)}{\cos \varphi \cos \varphi_0 \sin \alpha_p} - \frac{c}{\sin \psi}}{(ctg \alpha_p + ctg \psi) c} b'_c \quad (23)$$

Ширина крайніх бокових різців визначається відповідно до умови рівності глибин (20) і (23):

$$b' = \frac{b_c}{\frac{\rho}{\sin \psi} + \frac{\cos \delta}{\cos \lambda}} \quad (24)$$

Залежність відносної глибини сколювання від кута різання ножа для напівблокованого різання у верхньому ярусі для ґрунтів другої і третьої категорій наведені на рис. 4, б.

Розрахунки демонструють, що в разі зменшення кута різання ножа від 50° до 20° відносна глибина сколювання збільшується: для ґрунтів другої категорії (твердий супісок, напівтвердий суглинок, тугопластична глина) для напівблокованого різання від 5,87 до 9,17, для ґрунтів третьої категорії (твердий суглинок і напівтверда глина) від 2,92 до 7,32, для напівблокованого асиметричного різання від 9,10 до 14,07 та від 4,98 до 11,52.

Аналіз розрахунків відносної глибини сколювання для ґрунтів з близькими фізико-механічними властивостями (напівтвердий суглинок і тугопластична глина; твердий суглинок і напівтверда глина) демонструє, що зі збільшенням вологості відносна глибина зменшується, як і зі збільшенням коефіцієнта зчеплення ґрунту (твердий супісок, твердий суглинок).

Якщо ($\alpha_p = 30^\circ$), відносна глибина зсуву для різних ґрунтів змінюється в таких межах: для напівблокованого різання від 4,73 до 7,32, для напівблокованого асиметричного різання від 5,77 до 10,69.

Таким чином, на відносну глибину зсуву геометричні параметри різця впливають більше, ніж фізико-механічні параметри ґрунтів.

Висновки

Запропонована методика дозволяє під час проектування нової землерийної техніки підвищити її енергоефективність завдяки впровадженню процесу критичноглибинного напівблокованого різання ґрунтів.

Література

1. Mohammad Najafi. Trenchless technology piping. Installation and inspection. ASCEpress, WEF Press Water Environment Federation Alexandria. 2010. 482 с.
2. Hastak M., Gokhale S., Decision Tool for Selecting the Most Appropriate Technology for Underground Conduit Construction. Geological Engineering: Proceedings of the 1st International Conference. New York, 2009. DOI: 10.1115/1.802922. Paper 30.
3. Pridmore A., Geisbush J. Developing a Successful Specification for Horizontal Directional

- Drilling. Pipelines 2017. Pipelines Planning and Design Book set. 2017. P. 553–563. <https://doi.org/10.1061/9780784480878>.
4. Erez N. Allouche, Samuel T. Ariaratnam, State-Of-The-Art-Review Of No-Dig Technologies for New Installations. Published online. 2012. April 26. [https://doi.org/10.1061/40641\(2002\)55](https://doi.org/10.1061/40641(2002)55).
 5. Guojun Wen, Xiaoming Wu, Han Chen. Trenchless Pipe-Paving in Complex Hard Stratum by Directional Drilling Technology. Geological Engineering: Proceedings of the 1st International Baosong Ma. ASME. New York. 2009.
 6. Машини для земляних робіт / Хмара Л. А. та ін. Харків: ХНАДУ, 2014. 548с.
 7. Кравець С. В., Романовський А. Л. Підвищення ефективності використання меліоративних земель: тези доповідей Респ. наук.-техн. конф. Рівне, 1984.
 8. Основні принципи конструювання робочих органів для глибокої розробки талих ґрунтів / Кравець С. В., Ткачук В. Ф., Романовський О. Л., Нечидюк О. А. Механіз. та автоматиз. земляних робіт: зб. доп. XIУ Між. наук.-техн. конф. Київ, 1991. С. 260–262.
 9. Ткачук В. Ф., Кравець С. В., Кравець Л. Б. Визначення критичної глибини різання ґрунту ножем: зб. Респ. міжвід. наук.-техн. конф. Київ: Техніка, 1987. Вип. 40. С. 22–28.
 10. Rathje I. Der Schnittvorgang im Sande. «Forschungs-arbeiten auf dem Gebiete des Ingenieurwesens». Rathje, 1931. Н. 350.
 11. Godwin R. I., Spoor G. J. Soil failure with narrow tines. Agric Eng Res 22: 213–228. 1977.
 12. Станевський В. П. Удосконалення робочого процесу землерийних машин. Київ: Вища школа. Вид-во при КДУ, 1984. 128 с.
 13. Баловнев В. І., Хмара Л. А. Підвищення продуктивності машин для земляних робіт. Київ: Будівельник, 1988. 152 с.
 14. Полтавцев І. С., Орлов В. Б., Ляхович І. Ф. Спеціальні землерийні машини та механізми для міського будівництва. Київ: Будівельник, 1977. 136 с.
 15. Кравець С. В., Кирикович В. Д., Блажівський В. С. Визначення критичної глибини різання при напівблокованому різанні ґрунту. Вісник Націон. ун-ту водн. госп. та природокор. 2007. Вип. 3 (частина 2). С. 220–225.
 16. Кравець С. В. Ґрунтозахисні та енергозберігаючі матпани для прокладки підземних комунікацій (Основи теорії, проектування та створення: навч. посіб. Рівне: Вид-во РДТУ, 1999. 278 с. ISBN 966-7447-09-X.
 - Underground Conduit Construction. Geological Engineering: Proceedings of the 1st International Conference. New York, 2009. DOI: 10.1115/1.802922. P. 30.
 3. Pridmore A., Geisbush J. Developing a Successful Specification for Horizontal Directional Drilling. Pipelines 2017. Pipelines Planning and Design Book set. 2017. P. 553–563. <https://doi.org/10.1061/9780784480878>.
 4. Erez N. Allouche, Samuel T. Ariaratnam, State-Of-The-Art-Review Of No-Dig Technologies for New Installations. Published online. 2012. April 26. [https://doi.org/10.1061/40641\(2002\)55](https://doi.org/10.1061/40641(2002)55).
 5. Guojun Wen, Xiaoming Wu, Han Chen. Trenchless Pipe-Paving in Complex Hard Stratum by Directional Drilling Technology. Geological Engineering: Proceedings of the 1st International Baosong Ma. ASME. New York. 2009.
 6. Mashyny dlia zemlianykh robot / Khmara L. A. ta in. Kharkv: KhNADU, 2014. 548s.
 7. Kravets S. V., Romanovskiy A. L. Pidvyshchennia efektyvnosti vykorystannia melioratyvnykh zemel: tez. dop. resp. nauk.-tekhn. konf. Rivne, 1984.
 8. Osnovni pryntsy py konstruiuvannia robochykh orhaniv dlia hlybokoi rozrobky talykh gruntiv / Kravets S. V., Tkachuk V. F., Romanovskiy O. L., Nechydiuk O. A. Mekhaniz. ta avtomatyz. zemlianykh robot: zb. dop. XIU Mizh. nauk.-tekhn. konf. Kyiv, 1991. S. 260–262.
 9. Tkachuk V. F., Kravets S. V., Kravets L. B. Vyznachennia krytychnoi hlybyny rizannia ґрунту nozhem: zb. Resp. mizhvid. nauk.-tekhn. Kyiv: Tekhnika, 1987. Vyp. 40. S. 22–28.
 10. Rathje I. Der Schnittvorgang im Sande. «Forschungs-arbeiten auf dem Gebiete des Ingenieurwesens». Rathje, 1931. Н. 350.
 11. Godwin R. I., Spoor G. J. Soil failure with narrow tines. Agric Eng Res 22: 213–228. 1977.
 12. Stanevskiy V. P. Udoskonalennia robochoho protsesu zemleryinykh mashyn. Kyiv: Vyshcha shkola. Vyd-vo pry KDU, 1984. 128 s.
 13. Balovniev V. I., Khmara L. A. Pidvyshchennia produktyvnosti mashyn dlia zemlianykh robot. Kyiv: Budivelnik, 1988. 152 s.
 14. Poltavtsev I. S., Orlov V. B., Liakhovych I. F. Spetsialni zemleryini mashyny ta mekhanizmy dlia miskoho budivnytstva. Kyiv: Budivelnik, 1977. 136 s.
 15. Kravets S. V., Kyrykovych V. D., Blazhiivskiy V. S. Vyznachennia krytychnoi hlybyny rizannia pry napivblokovanomu rizanni hruntu. Visnyk Natsion. un-tu vodn. hosp. ta pryrodokor. 2007. Vyp. Z (chastyina 2). S. 220–225.
 16. Kravets S. V. Hruntozakhyisni ta enerhozberihaiuchi matpyny dlia prokladky pidzemnykh komunikatsii (Osnovy teorii, proektuvannia ta stvorennia): navch. posib. Rivne: Vyd-vo RDTU, 1999. 278 s. ISBN 966-7447-09-Kh.

References

1. Mohammad Najafi. Trenchless technology piping. Installation and inspection. ASCEpress, WEF Press Water Environment Federation Alexandria. 2010. 482 с.
2. Hastak M., Gokhale S., Decision Tool for Selecting the Most Appropriate Technology for

Кравець Святослав Володимирович, д.т.н., професор кафедри будівельних, дорожніх, меліоративних, сільськогосподарських машин і обладнання, Національний університет водного господарства та природокористування, вул. Олекси Новака, 77, м. Рівне, т. +380972891589, e-mail: s.v.kravets@nuwm.edu.ua,

Супонєв Володимир Миколайович, д.т.н., професор кафедри будівельних і дорожніх машин, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого 25, м. Харків, 61002, Україна, м.т. +380960580965, e-mail: suponev@ukr.net

Форсюк Сергій Леонідович, асистент кафедри будівельних, дорожніх, меліоративних, сільськогосподарських машин і обладнання, Національний університет водного господарства та природокористування, вул. Олекси Новака, 77, м. Рівне, м.т. +380963358832, e-mail: s.l.forsiuk@nuwm.edu.ua.

Determination of the critical depth of semi-blocked soil destruction with a straight cutter

Abstract. Problem. This scientific article is devoted to the method of determining the critical depth of soil destruction for the conditions of semi-blocked and semi-blocked asymmetric cutting (with a retaining wall on one side of the cutter) is considered. **Goal.** The purpose of this work is to create a method for determining the critical depth of soil cutting with a straight knife in the conditions of semi-blocked asymmetric cutting and to establish the regularities of the influence of the geometric parameters of the cutter and the physical and mechanical properties of the soil on it. **Methodology.** In the course of the study, the method of analytical calculation of parameters was used. **Results.** The calculations carried out in the paper show that when the cutting angle of the knife is reduced from 50° to 20° , the relative chipping depth increases. For soils with similar physical and mechanical properties, but with

different moisture content, the relative depth decreases with increasing moisture content. Such a dependence is also characteristic of increasing soil adhesion coefficients. With unchanged knife parameters ($\alpha_p = 30^\circ$), the relative shear depth for different soils varies in the upper tier is: for semi-blocked cutting from 4.73 to 7.32, for semi-blocked asymmetric - from 5.77 to 10.69. Thus, the geometric parameters of the soil development working body have a more significant effect on the relative depth of the shift than the physical and mechanical parameters of the soil. **Practical value.** The proposed technique allows for the design of new earthmoving equipment to increase its energy efficiency due to the introduction of critical-depth semi-blocked soil cutting.

Key words: energy intensity of soil destruction, critical depth cutting of soils, semi-blocked cutting, semi-blocked asymmetric cutting.

Kravets Sviatoslav Volodymyrovych, doctor of technical Sciences, professor of the Department of Construction, Road, Reclamation, Agricultural Machinery and Equipment, National University of Water Management and Nature Management, Rivne, str. Oleksy Novaka, 77, m.t. +380972891589, e-mail: s.v.kravets@nuwm.edu.ua

Suponiev Volodymyr Mykolaiovych, doctor of technical Sciences, professor of the Department of Construction And Road Machinery, Kharkiv National Automobile and Road University, str. 25 Yaroslav Mudryho Street, Kharkiv, Ukraine, 61002, m.t. +380960580965, e-mail: suponev@ukr.net

Forsiuk Serhii Leonidovych, assistant of the Department of Construction, Road, Reclamation, Agricultural Machinery and Equipment, National University of Water Management and Nature Management, Rivne, st. Oleksy Novaka, 77, m.t. +380963358832, e-mail: s.l.forsiuk@nuwm.edu.ua.